

**KEMUNGKINAN PENGGUNAAN ANTIOKSIDAN GUNA
MEMPERTINGGI KETAHANAN OKSIDASI BIODIESEL DARI MINYAK
BIJI TANAMAN JARAK PAGAR (*Jatropha curcas* L.)**
*(The Possible Uses of Antioxidant to Increase Oxidation Resistance of Biodiesel
Synthesized from Jarak-pagar (*Jatropha curcas* L.) Seed Oil)*

Oleh / By:

¹Han Roliadi, ¹R. Sudradjat, & ²Arum Anggraini

¹Pusat Penelitian dan Pengembangan Keteknikan Kehutanan
dan Pengolahan Hasil Hutan

Jl. Gunung Batu No. 5 Bogor 16610, Tlp. 0251-8633378, Fax. 0251-8633413

²Fakultas Kehutanan IPB
Kampus IPB Darmaga, Bogor

Diterima 29 Nopember 2011, disetujui 5 Maret 2012

ABSTRACT

*The experiment has been done to look into the utilization of *Jatropha curcas* oil for biodiesel as the alternative of the fossil-based diesel oil through the estrans (esterification and transesterification) process and the use of antioxidants. The estrans process brought about favorable changes in the oil characteristics (e.g., the decreases in density, viscosity, acid number, and iod number), thereby enhancing its performance as biodiesel.*

Three kinds of antioxidants were used (i.e. TBHQ, BHT, and Formula X), each with varying concentrations (0.03-0.10%), and storage duration were imposed from the first until fourth week. The examined responses comprised of peroxide number, acid number, and kinematic viscosity. Reaching the fourth week, however, the oxidation process still occurred to the biodiesel oil despite using antioxidants (slight increases in peroxide number, acid number, and kinematic viscosity), but with the intensity far less than that of the control biodiesel (without antioxidant). The antioxidant regarded as the most effective inhibiting such oxidation was TBHQ, followed in decreasing order by BHT and Formula X. However, the Formula X could expectedly perform as effectively as TBHQ and BHT, but with higher concentration (>0.10%). The characteristics of biodiesel either the control or with antioxidants (up to the fourth week duration) could still satisfy the SNI criteria and those of fossil-based diesel oil.

*Keywords: Fossil fuel, alternative sources, *Jatropha curcas* seed oil, estrans, biodiesel, antioxidants, characteristics*

ABSTRAK

Telah dilakukan percobaan kemungkinan pemanfaatan minyak biji jarak pagar (*Jatropha curcas*) untuk biodiesel sebagai alternatif petrosolar melalui proses estrans (esterifikasi dan transesterifikasi) dan penggunaan bahan antioksidan.

Proses estrans mengakibatkan perubahan karakteristik minyak jarak (antara lain penurunan kerapatan, viskositas, bilangan asam, dan bilangan iod), sehingga meningkatkan kinerjanya sebagai biodiesel. Tiga macam bahan antioksidan digunakan (BHT, TBHQ, dan Formula X), masing-masing dengan variasi konsentrasi 0,03-0,10%, dan sesudahnya diberi tenggang waktu mulai dari minggu pertama hingga minggu ke empat. Respons yang diamati adalah bilangan peroksida, bilangan asam, dan viskositas kinematik. Hingga minggu keempat pada biodiesel dengan penggunaan antioksidan tetap terjadi oksidasi (bilangan peroksida, bilangan asam, dan viskositas biodiesel meningkat), tetapi dengan

intensitas jauh lebih rendah dibandingkan dengan biodiesel kontrol (tanpa antioksidan). Antioksidan yang paling efektif menghambat oksidasi adalah TBHQ, disusul oleh BHT dan Formula X. Formula X diharapkan bisa seefektif seperti TBHQ dan BHT, tetapi pada konsentrasi lebih tinggi ($>0.10\%$). Karakteristik biodiesel baik kontrol ataupun yang diberi antioksidan (hingga tenggang waktu minggu keempat) banyak memenuhi persyaratan SNI dan sebanding dengan karakteristik petrosolar.

Kata kunci: Bahan bakar fosil (minyak bumi), sumber alternatif, minyak biji jarak (biodiesel), estrans (esterifikasi dan transesterifikasi), bahan antioksidan, karakteristik

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi untuk bahan bakar (transportasi, industri, dan rumah tangga), di Indonesia hampir seluruhnya berasal dari bahan bakar fosil, yang berasal dari sisa jasad tumbuhan dan binatang berukuran amat kecil (mikro) yang terpendam ratusan juta tahun yang lalu menjadi barubara, minyak bumi, dan gas alam, di mana keseluruhannya disebut bahan bakar fosil yang bersifat tidak terbarukan (Anonim, 1993; 2008).

Terdapat kecenderungan bahwa ekstraksi dan penggunaan bahan bakar fosil (terutama minyak bumi) berlangsung lebih cepat, sehingga suatu saat sumber tersebut akan habis. Diperkirakan sumber minyak bumi Indonesia akan habis tahun 2025. Ini disebabkan cadangan minyak bumi Indonesia hingga tahun 2007 hanya sebanyak 9 ribu juta barrel, sedangkan konsumsi tahunan minyak bumi sebesar 500.000 barrel (Anonim, 2008). Di antara langkah yang bisa dilakukan adalah penghematan penggunaan bahan bakar fosil yang masih ada, dan pengembangan sumber energi alternatif terbarukan. Di Indonesia sumber yang diharapkan dapat dikembangkan dan dimanfaatkan sebagai energi terbarukan di antaranya minyak dari tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.).

Satu pohon jarak pagar dapat menghasilkan 2 - 2,5 kg biji kering per tahun (Heyne, 1987). Pada satu hektar lahan dapat tumbuh 2000 batang pohon yang akan menghasilkan 4 - 5 ton biji kering per tahun. Rendemen minyak yang diperoleh dari biji kering berkisar 30 - 50% tergantung dari cara ekstraksi (pengempaan) dan macam alat kempa yang digunakan, sehingga dari 4 - 5 ton biji kering jarak pagar tersebut dapat dihasilkan 1000-1500 liter minyak jarak per tahun (Sudradjat, 2006). Angka ini menunjukkan prospek positif pemanfaatan minyak jarak sebagai sumber energi alternatif terbarukan (biodiesel).

Biodiesel jarak pagar sebagai minyak nabati termasuk golongan lipida, sebagian besar merupakan senyawa ester dengan kandungan asam lemak tidak jenuh atau ikatan rangkap yang tinggi (Gubitz, 1999). Bilangan iodnya minyak jarak pagar tinggi (rata-rata 96,5), sehingga biodieselnnya selama proses penyimpanan ataupun penggunaannya berpotensi rentan terhadap kerusakan oksidasi menjadi senyawa peroksida, dan selanjutnya akan terdekomposisi menjadi aldehida dan asam karboksilat (Perkins, 1967; Rizvi, 1992). Adanya asam karboksilat berakibat peningkatan bilangan asam biodiesel jarak pagar, dan menyebabkan korosi logam. Hal ini dapat mempengaruhi kinerja minyak jarak sebagai biodiesel untuk menggerakkan mesin berpiston. Oleh sebab itu perlu penambahan aditif pada biodiesel jarak pagar berupa antioksidan untuk menghambat proses oksidasi selama penyimpanan atau penggunaannya.

Ester pada minyak jarak sebagian besar merupakan trigliserida, dengan demikian minyak karakteristik alami seperti kerapatan, viskositas, dan bilangan iod yang masih tinggi, sehingga dapat menurunkan kinerja minyak jarak sebagai biodiesel. Diharapkan melalui proses estrans terhadap minyak tersebut dapat memperbaiki karakteristiknya sehubungan dengan usaha pemanfaatannya untuk biodiesel (Sonntag, 1982; Haas *et al.*, 2000; Canacki dan Gerpen, 2001; Ambarita, 2002). Terkait dengan uraian tersebut dan sebagai usaha meningkatkan kinerja minyak jarak pagar sebagai biodiesel, telah dilakukan percobaan penggunaan bahan aditif antioksidan sebanyak 3 macam yaitu TBHQ, BHT, dan Formula X masing-masing pada berbagai tingkat konsentrasi pada minyak jarak (setelah sebelumnya mengalami proses estrans), dan selanjutnya ditelaah pengaruh bahan aditif tersebut terhadap sifat fisiko-kimianya, dengan tujuan utama menelaah seberapa jauh efektifitas

bahan aditif menghambat proses oksidasi biodiesel.

II. BAHAN DAN METODE

A. Bahan dan Alat

Bahan utama penelitian yang digunakan adalah minyak jarak pagar kasar yang diperoleh dari hasil pengempaan mekanis biji jarak. Bahan kimia mencakup methanol, etanol, NaOH, asam oksalat, kloroform, asam asetat glacial, pereaksi wijs, larutan KI 20%, larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,1 N dan 0,02 N, HCl 4 N, HCl 0,5 N beralkohol, indikator fenolftalein, indikator kanji, kertas pH, dan air demineralisasi.

Alat yang digunakan adalah labu bulat berleher dua, erlenmeyer, gelas piala, buret, pipet volumetrik, gelas ukur, hot plate, *stirrer*, corong pemisah, pendingin tegak, penangas air, termometer, viskometer Ostwald, piknometer, cawan porselen, oven, desikator, dan kertas saring.

B. Prosedur Kerja

Metodologi yang dilakukan di sini mencakup penelitian pendahuluan dan penelitian utama.

1. Penelitian pendahuluan

Penelitian pendahuluan bertujuan mencermati sifat awal minyak jarak pagar sebelum diolah menjadi biodiesel, yang mencakup pemeriksaan

sifat fisiko-kimia minyak jarak pagar awal yaitu meliputi pengukuran kerapatan, viskositas, bilangan asam, kadar air, bilangan penyabunan, bilangan iod, dan kadar asam lemak bebas atau FFA (*free fatty acid*) (Anonim, 2006).

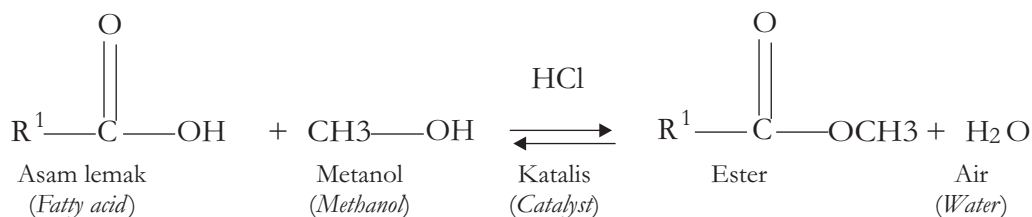
2. Penelitian utama

Penelitian utama dilakukan untuk memproduksi biodiesel melalui proses estrans, dan mencermati pengaruh jenis dan konsentrasi anti oksidan terhadap sifat fisiko-kimia biodiesel yang dihasilkan.

a. Pembuatan biodiesel

1) Esterifikasi

Minyak jarak pagar disaring dengan kertas saring, lalu diperiksa kadar asam lemak bebas (FFA), selanjutnya dilakukan proses esterifikasi dengan memanaskan minyak jarak hingga suhu 60°C . Dengan mempertahankan pada suhu tetap, selanjutnya ditambahkan campuran metanol dan katalis HCl. Banyaknya metanol yang ditambahkan berdasarkan rasio molar 2 : 1 terhadap FFA, sedangkan banyaknya penambahan HCL sebanyak 1% dari berat minyak jarak (b/v). Penambahan metanol menyebabkan reaksi esterifikasi minyak jarak, sehingga asam lemak bebas dikonversi menjadi metil ester (Gambar 1). Reaksi ini berlangsung selama 2 jam di mana sebagai sumber panas (guna menjaga suhu 60°C) adalah bagian atas *stirrer hot plate*. Sesudahnya dilakukan pemisahan fraksi air (H_2O) dengan cara *ageing* selama 3 - 5 jam.

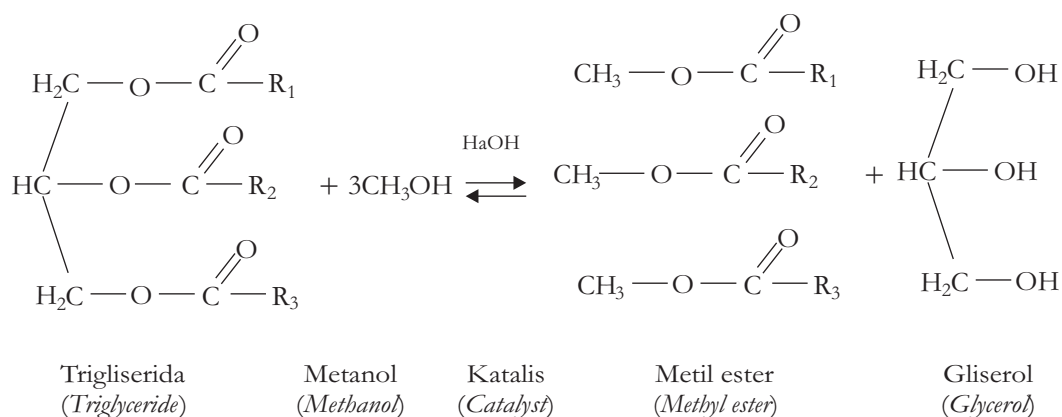


Gambar 1. Reaksi esterifikasi (Ege, 1996)
Figure 1. Esterification reaction (Ege, 1996)

2) Transesterifikasi

Minyak jarak yang telah diesterifikasi dan sudah dipisahkan dari air, dilakukan proses transesterifikasi dengan mula-mula menjaga suhu minyak tersebut 60°C . Selanjutnya ditambahkan campuran metanol dan katalis NaOH 0,5%, di mana banyaknya metanol berdasarkan rasio molar 6:1 yaitu antara metanol dengan trigliserida (Gambar 2), dan selanjutnya dikondisikan selama 0,5-1 jam. Selanjutnya

biodiesel dipisahkan dari fraksi gliserol dengan cara *ageing* pula selama 3-5 jam, kemudian dinetralkan menggunakan asam asetat (CH_3COOH) 0,01% yang akan mengikat sisa katalis (NaOH) yang masih terdapat pada biodiesel, membentuk endapan berwarna putih sehingga mudah dipisahkan. Tahap berikutnya, dilakukan dilakukan pencucian terhadap biodiesel menggunakan air hangat hingga pH air cucian menjadi netral.



Gambar 2. Reaksi transesterifikasi (Ege, 1996)
Figure 2. Transesterification reaction (Ege, 1996)

b. Penambahan antioksidan

Sebelum penambahan antioksidan, dilakukan karakterisasi terhadap biodiesel, dan kemudian dibandingkan dengan standar Indonesia (Anonim, 2006). Karakterisasi tersebut mencakup analisis bilangan asam, bilangan penyabunan, bilangan iod, kadar air, kerapatan, viskositas, dan bilangan peroksida.

Antioksidan yang ditambahkan ada 3 jenis yaitu BHT (*butylated hydroxytoluene*), TBHQ (*tert-butylated hydroquinone*), dan Formula X (*organic-incorporated phenol*). Biodiesel setelah ditambah masing-masing antioksidan tersebut, disimpan selama 4 minggu pada suhu ruang.

C. Pengujian Mutu Biodiesel

Selama penyimpanan 4 minggu, pada tiap selang satu minggu (7 hari) dilakukan pengujian mutu atau pemeriksaan sifat fisiko-kimia biodiesel, mencakup bilangan peroksida, FFA, dan viskositas. Selama 4 minggu tersebut, di samping suhu kamar tetap dijaga, biodiesel tersebut ditempatkan dalam botol kaca bening, dan ditutup kain kasa (tidak kedap udara). Ini dimaksudkan agar keberadaan cahaya dan oksigen yang merupakan faktor mempercepat proses oksidasi minyak tidak terhalangi, sehingga aktifitas 3 macam antioksidan tersebut dapat dicermati kemampuannya dalam menghambat proses tersebut.

D. Rancangan Percobaan dan Analisis Data

Rancangan percobaan untuk menelaah pengaruh bahan antioksidan tersebut terhadap mutu biodiesel minyak jarak (bilangan peroksida, bilangan asam (FFA), dan viskositas) menerapkan rancangan acak lengkap berpola faktorial. Sebagai faktor adalah macam antioksidan (A) yang terdiri dari 3 macam (BHT, TBHQ, dan dan Formula X); konsentrasi antioksidan (B) dalam 5 taraf yaitu 0%; 0,03%; 0,05%; 0,07%; dan 0,10%; dan waktu penyimpanan (C) mulai dari minggu ke 0, 1, 2, 3, hingga ke 4. Rancangan tersebut terdiri dari 3 x 4 x 5 atau 60 satuan percobaan, dan setiap satuan tersebut diulang (R) sebanyak 2 kali. Selanjutnya untuk menelaah ada tidaknya perbedaan karakteristik (mutu) antara biodiesel yang diberi perlakuan antioksidan dengan biodiesel kontrol (tanpa penggunaan antioksidan), digunakan pula analisa keragaman yang kemudian dilanjutkan juga dengan uji BNJ (Ott, 1994).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penelitian Pendahuluan

Data hasil penelitian pendahuluan yaitu karakteristik atau sifat fisiko-kimia minyak jarak pagar disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisiko-kimia minyak jarak pagar**Table 1. Physico-chemical properties of *Jatropha curcas castor oil***

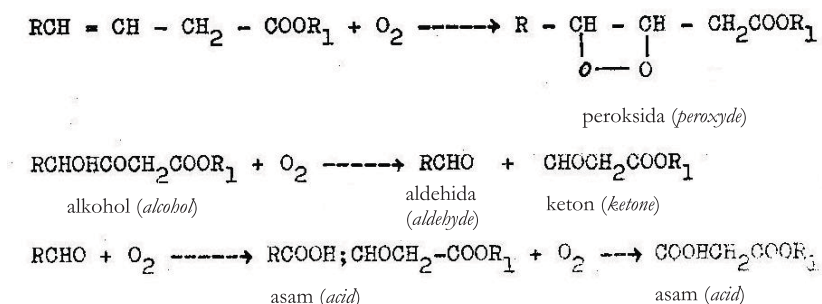
No.	Sifat/ karakteristik (<i>Properties/ characteristics</i>)	Satuan (<i>Units</i>)	Nilai (<i>Values</i>)
1	Kerapatan (<i>Density</i>), 15°C	g/ml	0,9007
2	Viskositas kinematik (<i>Kinematic viscosity</i>), 40°C	Cst	27,28
3	Bilangan asam (<i>Acid value</i>)	mg KOH/ g	11,58
4	Bilangan iod (<i>Iod number</i>)	g I ₂ / 100 g	95
5	Bilangan penyabunan (<i>Saponification number</i>)	mg KOH / g	189,92
6	Kadar air (<i>Moisture content</i>)	%	0,08
7	Bilangan peroksida (<i>Peroxide number</i>)	mg O ₂ / 100 g	4,75

Kerapatan biodiesel minyak jarak pagar (0,9007 g/ml) lebih tinggi di bandingkan kerapatan biodiesel sawit dan petrosolar (Tabel 2). Kerapatan minyak dalam bentuk ester (termasuk minyak jarak pagar dan minyak sawit) dipengaruhi oleh berat molekul asam lemak penyusun ester tersebut. Tingginya kerapatan biodiesel ini mengindikasikan tingginya berat molekul asam lemak penyusun ester pada minyak jarak. Lebih tingginya kerapatan biodiesel minyak jarak pagar dibandingkan kerapatan petrosolar dapat dipahami karena solar sebagian besar tersusun oleh hidrokarbon (alkana) dengan berat molekul lebih kecil dari pada asam lemak penyusun ester minyak jarak (Ege, 1996).

Dalam hal bilangan iod, nilainya untuk biodiesel minyak jarak juga lebih tinggi dari pada biodiesel sawit (Tabel 2). Hal ini memberi indikasi bahwa asam lemak penyusun ester minyak jarak lebih banyak ikatan rangkapnya (tidak jenuh) dibanding minyak sawit. Hal ini dapat dipahami karena ester minyak jarak tersusun oleh asam oleat (34 - 45%) dan asam linoleat (29 - 44%) (Anggraini, 2007). Banyaknya ikatan rangkap tersebut menyebabkan biodiesel minyak jarak lebih rentan terhadap kerusakan oksidasi oleh cahaya, suhu tinggi, dan oksigen.

Salah satu konsekuensi dari perubahan oksidatif minyak tak jenuh adalah terbentuknya aldehida dan asam karboksilat melalui pembentukan senyawa peroksida sebagai produk antara (Ingold, 1962; Ege, 1996), dan hal ini ditunjukkan dengan nilai bilangan peroksida awal minyak jarak pagar sebesar 4,75 (Tabel 1). Dugaan adanya degradasi oksidatif pada asam lemak tak jenuh terindikasi dengan tingginya bilangan asam minyak jarak (mencapai 11,58). Ini dapat dimengerti karena diantara produk akhir degradasi tersebut adalah aldehida dan asam karboksilat (Gambar 3). Di samping itu tingginya bilangan asam tersebut juga bisa diakibatkan adanya hidrolisa oleh air dan aktifitas enzim hidrolitik (Gambar 4).

Selanjutnya, viskositas kinematik biodiesel minyak jarak jauh lebih tinggi dibandingkan viskositas biodiesel sawit dan petrosolar (Table 2). Diduga karena tingginya berat molekul asam lemak penyusun ester minyak jarak, sebagaimana diindikasikan dengan tingginya kerapatan minyak jarak tersebut (Tabel 1). Hal ini perlu diperhatikan karena viskositas minyak yang tinggi akan menghambat gerakannya sebagai fluida, sehingga selanjutnya berpengaruh pada sistem *fuel injector*, dan akumulasi bahan bakar pada tahapan tertentu dalam mesin diesel (Anggraini, 2007).

**Gambar 3. Mekanisme reaksi oksidasi terhadap asam lemak terutama yang berikatan jenuh (Ingold, 1962; Pari, 1983; Buck, 1991)****Figure 3. Mechanism of oxidative reaction that occurs to the unsaturated fatty acids particularly those with unsaturated bonds (Ingold, 1962; Pari, 1983; Buck, 1991)**

Tabel 2. Sifat fisiko-kimia biodiesel sawit dan petrosolar**Table 2. Physico-chemical properties of palm-oil and solar (fossil-derived diesel oil)**

No	Sifat/Karakteristik (<i>Properties/ characteristics</i>)	Nilai (<i>Values</i>)		
		Biodiesel sawit (<i>Palm-oil biodiesel</i>) ^{*)}	Petrosolar (<i>Fossil-derived diesel fuel</i>) ^{*)}	(Standar) (<i>Standard</i>) ^{**)}
1	Kerapatan (<i>Density</i>), g/ml (15° C)	0,868	0,83	0,850-0,890
2	Viskositas kinematik (<i>Kinematic viscosity</i>), Cst (40° C)	5,3	5,2	1,9-6,0
3	Bilangan asam (<i>Acid value</i>), mg KOH/g	-	-	≤ 0,8
4	Bilangan iod (<i>Iod number</i>), g I ₂ /100 g	45-62	-	≤ 115
5	Bilangan penyabunan (<i>Saponification number</i>), mg KOH/g	209,7	-	-
6	Kadar air (<i>Moisture content</i>), %	-	-	≤ 0,05
7	Bilangan peroksida (<i>Peroxide number</i>), mg O ₂ /100 g	-	-	-
8	Nilai kalor (<i>Calorific value</i>), cal/g	8843,21-9082,21	9799,24	
9	Abu tersulfat (<i>Sulphated ash</i>), %			≤ 0,02
10	Bilangan ester (<i>Ester number</i>), mg KOH/g	-	-	-
11	Kadar sulfur (<i>Sulphur content</i>), ppm	<50	≤500	

Keterangan (*Remarks*): ^{*)} Hambali, *et al*, (2006); ^{**)} Standar mutu biodiesel Indonesia / *Quality standard for Indonesia's biodiesel qualities* (Anonim, 2006); - data tak tersedia (*data not available*)

Dibandingkan dengan standar mutu biodiesel Indonesia (Tabel 2), ternyata nilai kerapatan, viskositas kinematik, bilangan asam, dan bilangan iod biodiesel minyak jarak lebih tinggi dari batas maksimum nilai pada standar biodiesel (Anonim, 2006).

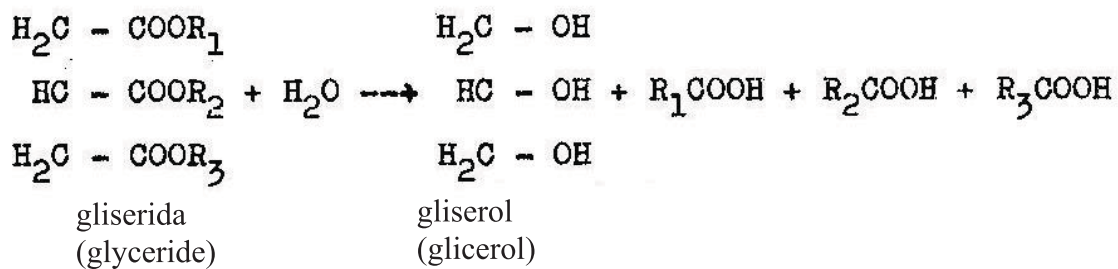
B. Penelitian Utama

1. Karakterisasi biodiesel melalui esterifikasi dan transesterifikasi

Proses esterifikasi biodiesel minyak jarak berakibat terjadinya penurunan bilangan asam dari 12 menjadi 1,125. Selanjutnya dengan proses transesterifikasi bilangan asam tersebut menjadi 0,2 (Gambar 5). Penurunan bilangan asam minyak jarak setelah esterifikasi dapat dipahami karena esterifikasi yang menggunakan metanol (dengan katalis asam kuat HCl) berakibat terjadinya perubahan asam lemak bebas pada minyak tersebut menjadi ester (Gambar 1). Selanjutnya, turunnya bilangan asam melalui proses transesterifikasi terhadap minyak hasil esterifikasi terjadi karena metanol yang digunakan

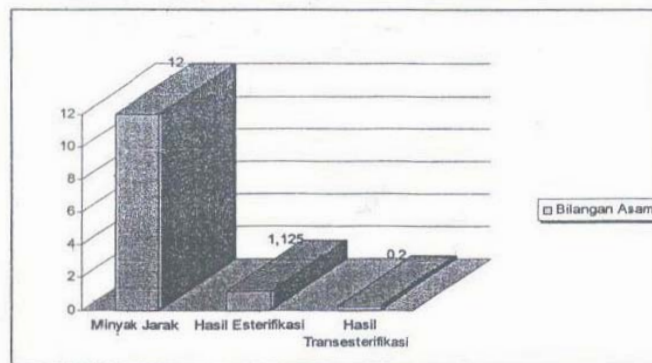
(dengan katalis basa kuat NaOH) selain sebagian besar mengakibatkan esterifikasi trigliserida (Gambar 2), juga mengesterifikasi sisa-sisa asam lemak bebas yang masih terdapat pada hasil esterifikasi (Gambar 1). Baik esterifikasi dan transesterifikasi sebagaimana diuraikan sebelumnya berakibat terbentuknya metil ester, dengan mekanisme reaksi melalui protonasi gugusan karbonil (Gambar 6).

Lebih lanjut hasil karakterisasi biodiesel hasil esterifikasi dan transesterifikasi minyak jarak pagar di sajikan pada Tabel 3. Dibandingkan dengan sebelum dilakukan estrans (Tabel 1), pada biodiesel minyak jarak setelah estrans terjadi penurunan kerapatan, viskositas kinematik, bilangan asam, dan bilangan iod (berturut-turut 0,9007 menjadi 0,8676 g/ml, 27,28 menjadi 2,33 Cst, 11,58 menjadi 0,20 mg KOH/g, dan 95 menjadi 84,85 g I₂/100 g); sedangkan dalam hal bilangan peroksida tak terjadi perubahan (4,75), dan selanjutnya untuk kadar air dan bilangan penyabunan cenderung meningkat (berturut-turut 0.08 menjadi 0.12%, dan 189,92 menjadi 200,61 mg KOH/g).



Gambar 4. Mekanisme reaksi hidrolisa pada lemak/minyak (Sonntag, 1982)

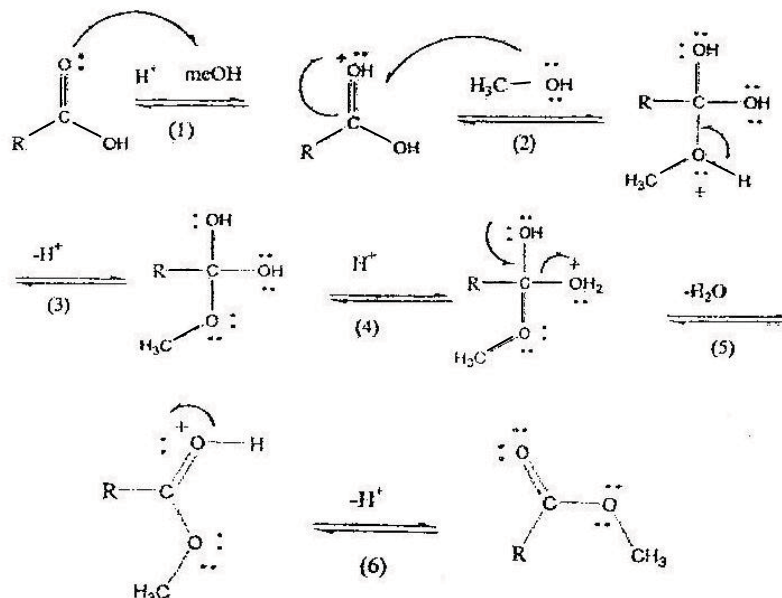
Figure 4. Mechanisms of hydrolysis reaction occurred at fat/oil (Sonntag, 1982)



Gambar 5. Penurunan bilangan asam selama proses pembuatan biodiesel (esterifikasi dan transesterifikasi minyak jarak)

Figure 5. The decrease in acid number of *Jatropha curcas* oil biodiesel (through esterification and transesterification)

Keterangan (Remarks): Penurunan bilangan asam selama pembuatan biodiesel = The decrease in acid number during the synthesis of biodiesel, Bilangan asam = Acid number, Minyak jarak = *Jatropha curcas* oil (immediately after being extracted from its corresponding seeds, Hasil esterifikasi = Results of esterification, Hasil transesterifikasi = Results of transesterification



Gambar 6. Mekanisme reaksi protonasi gugusan karbonil pada pembentukan metil ester (Gubitz, 2001)

Figure 6. Reaction mechanisms of protonation on carbonyl group in the formation of methyl ester (Gubitz, 2001)

Tabel 3. Karakteristik biodiesel hasil esterifikasi dan transterifikasi minyak jarak pagar
Table 3. Characteristics of biodiesel resulting from the esterification and transesterification on the *Jatropha curcas castor oil*

No,	Sifat / karateristik (<i>Properties / characteristics</i>)	Satuan (<i>Units</i>)	Nilai (<i>Values</i>)
1	Kerapatan (<i>Density</i>), 15°C	g/ml	0,8676
2	Viskositas kinematik (<i>Kinematic viscosity</i>), 40°C *)	Cst	2,33
3	Bilangan asam (<i>Acid value</i>)	mg KOH/ g	0,20
4	Bilangan iod (<i>Iod number</i>)	g I ₂ / 100 g	84,85
5	Bilangan penyabunan (<i>Saponification number</i>)	mg KOH / g	200,61
6	Kadar air (<i>Moisture content</i>)	%	0,12
7	Bilangan peroksida (<i>Peroxide number</i>)	mg O ₂ / 100 g	4,75
8	Nilai kalor (<i>Calorific value</i>)	cal/g	7352
9	Abu tersulfat (<i>Sulphated ash</i>)	%	0,024
10	Bilangan ester (<i>Ester number</i>)	mg KOH / g	200,41
11	Kadar sulfur (<i>Sulphur content</i>), ppm	%	-

Keterangan (*Remarks*): *) pada suhu ruang, viskositas kinematik = 4,63 Cst (*At ambient temperature, the kinematic viscosity = 4.63 Cst*)

Penurunan kerapatan dan viskositas kinematik diduga akibat proses transesterifikasi yang memecah trigliserida menjadi ester dengan berat molekul lebih rendah dan struktur bangun lebih sederhana seperti monogliserida atau digliserida (Gambar 2). Selanjutnya menurunnya bilangan asam akibat dari proses esterifikasi, dimana asam lemak bebas diubah menjadi metil ester (Gambar 1). Penurunan bilangan iod diduga terkait adanya perlakuan pemanasan pada proses estrans terhadap minyak jarak pagar (Gambar 1 dan 2), yang dapat mendegradasi ikatan rangkap (tidak jenuh) dalam bentuk seperti reaksi adisi (merubah ikatan rangkap menjadi ikatan jenuh), reaksi oksidasi (membentuk senyawa peroksida sebagai produk antara), dan pemutusan ikatan rangkap (Ege, 1996).

Bilangan peroksida minyak jarak yang tidak berubah pada minyak jarak baik sebelum ataupun sesudah proses estrans (Tabel 1 dan 3) mengindikasikan bahwa degradasi ikatan rangkap akibat perlakuan panas selama estrans tersebut tidak dalam hal terbentuknya senyawa peroksida, tetapi kemungkinan dalam bentuk reaksi adisi atau pemutusan ikatan rangkap. Peningkatan kadar air minyak jarak setelah proses estran, diduga ada kaitannya dengan terbentuknya air terutama pada reaksi esterifikasi (Gambar 1). Lebih lanjut meningkatnya bilangan penyabunan sesudah proses estrans diduga terkait dengan pemutusan ikatan rangkap yang kemudian diikuti dengan terbentuknya asam-asam organik (khususnya yang bergugus karboksilat).

Dibandingkan dengan standar biodiesel Indonesia (Tabel 2), maka karakteristik biodiesel minyak jarak setelah melalui estrans (Tabel 3) ditinjau dari kerapatan, viskositas kinematik, bilangan asam, bilangan iod, dan abu tersulfat memenuhi syarat, kecuali kadar air (berturut-turut 0,9007-0,8676 g/ml, 27,28-2,33 Cst, 11,58-0,20 mg KOH/g, 95-84,85 mg KOH/g, dan 0.024%). Lebih lanjut, ternyata nilai kalor biodiesel tersebut (7352 cal/g) masih di bawah nilai kalor biodiesel minyak sawit dan petrosolar (Tabel 2). Diduga pada biodiesel minyak sawit ikatan rangkapnya lebih sedikit dari pada biodiesel minyak jarak dan juga asam lemak penyusun esternyapun berbeda. Lebih lanjut pada petrosolar senyawa kimia penyusunnya adalah hidrokarbon (alkana), sedangkan penyusun pada biodiesel minyak jarak adalah ester (Ege, 1996).

2. Pencermatan pengaruh bahan antioksidan

Data karakteristik biodiesel minyak jarak pagar (bilangan peroksida, bilangan asam, dan viskositas kinematik) akibat penggunaan bahan anti oksidan sebanyak 3 macam, masing-masing dengan konsentrasi bervariasi disajikan pada Lampiran 1. Analisa keragaman menunjukkan bahwa pengaruh macam bahan antioksidan (A), konsentrasi antioksidan (B), dan minggu penyimpanan (C), berikut interaksinya (ABC) nyata terhadap 3 aspek karakteristik tersebut (Tabel 4).

a. Bilangan peroksida

Bilangan peroksida biodiesel baik pada kontrol ataupun dengan penggunaan antioksidan berkisar 4,75-68,82 (Lampiran 1). Berdasarkan hasil analisa keragaman (Tabel 4) dan uji BNJ (Lampiran 1), ternyata secara keseluruhan bilangan peroksida biodiesel minyak jarak kontrol lebih tinggi (sekitar 205-1349%) dibandingkan nilai untuk biodiesel dengan penggunaan antioksidan (BHT, TBHQ, dan Formula X). Ini menunjukkan bahwa antioksidan berperan menghambat proses oksidasi biodiesel. Bilangan peroksida biodiesel baik dengan antioksidan ataupun tanpa (kontrol) cenderung meningkat dengan meningkatnya waktu (minggu) penyimpanan. Lebih lanjut, peningkatan konsentrasi masing-masing 3 macam antioksidan (BHT, TBHQ, dan Formula X) cenderung menghambat oksidasi biodiesel sebagaimana ditunjukkan dengan semakin menurunnya bilangan peroksida.

Secara keseluruhan mulai dari minggu pertama hingga keempat berdasarkan hasil uji BNJ (Lampiran 1), ternyata efektifitas tertinggi dalam menghambat oksidasi biodiesel adalah pada penggunaan antioksidan TBHQ, disusul oleh BHT hingga Formula X (efektifitas terendah). Dari Gambar 7 terlihat bahwa efektifitas antioksidan (BHT, TBHQ, dan Formula X) meningkat (bilangan peroksida menurun) dengan semakin tinggi konsentrasinya, dan membuktikan pula bahwa bahwa efektifitas antioksidan TBHQ memang paling efektif (bilangan peroksida paling rendah).

Senyawa BHT, TBHQ, dan Formula X merupakan bahan antioksidan golongan fenolik (F), di mana reaksi penghambatan oksidasi berlangsung dengan cara menyumbangkan atom hydrogen (H) pada bahan fenolik tersebut ke radikal lipida (R^*) dan selanjutnya mengubahnya menjadi bentuk yang lebih stabil (R). Radikal lipida tersebut terbentuk pada tahap inisiasi akibat proses oksidasi senyawa lipida, Inisiasi tersebut terjadi pada gugusan methylene ($-CH_2-$) yang berdekatan dengan ikatan rangkap $C=C$. Sementara itu turunan radikal antioksidan yang terbentuk (F^*) setelah melepaskan atom H bersifat lebih stabil dibandingkan radikal lipida (Buck, 1991).

Efektifitas antioksidan dalam menghambat reaksi oksidasi dipengaruhi oleh kemampuannya mendonorkan atom H pada radikal lipida, dan

kemampuan tersebut terkait erat dengan susunan molekul antioksidan sendiri. Pada TBHQ dan BHT, sama-sama terdapat gugusan t-butil sebagai substansi pada posisi ortonya (Gambar 8). Dalam penelitian ini, TBHQ merupakan antioksidan paling efektif menghambat proses oksidasi biodiesel minyak jarak. Ini disebabkan TBHQ memiliki 2 gugusan OH sehingga dapat menyumbangkan 2 atom H pada radikal lipida, sehingga lebih efektif menstabilkan lipida tersebut. Formula X merupakan antioksidan fenolik alami, dengan demikian diperkirakan prinsip mekanisme kerjanya serupa dengan BHT dan TBHQ. Di antara tiga macam antioksidan tersebut, efektifitas antioksidan tersebut paling rendah (Gambar 7). Meskipun demikian tidak berarti tidak efektif menghambat oksidasi. Diharapkan efektifitas Formula X dapat ditingkatkan dengan peningkatan konsentrasinya.

Selanjutnya pada Gambar 7 terlihat pula bahwa tanpa antioksidan (kontrol), nilai bilangan peroksida biodiesel jauh di atas nilai untuk biodiesel dengan 3 macam antioksidan (BHT, TBHQ, dan Formula X), pada pertambahan waktu (minggu) penyimpanan. Ini mengindikasikan bahwa proses oksidasi biodiesel tanpa oksidan berlangsung dengan cepat dan tanpa hambatan. Ini memperkuat indikasi pula biodiesel minyak jarak banyak tersusun oleh asam lemak tidak jenuh sehingga rentan terhadap proses oksidasi di mana terbentuk senyawa peroksida sebagai produk antara (Gambar 3).

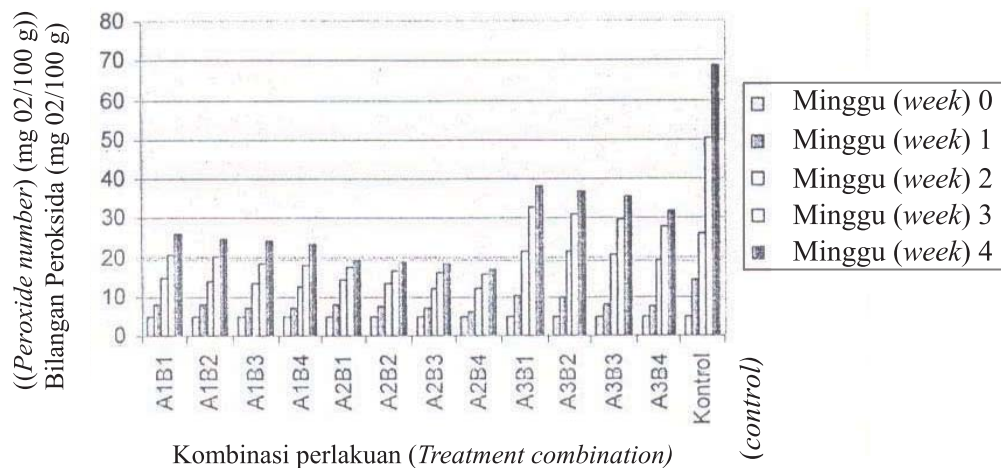
Berdasarkan hasil uji BNJ (Lampiran 1) maka kombinasi perlakuan yang terbaik dalam menghasilkan bilangan peroksida terendah, baik untuk minggu penyimpanan ke dua, ke tiga, ataupun ke empat adalah biodiesel dengan penggunaan antioksidan BHT pada konsentrasi 0,10%.

b. Bilangan asam

Berdasarkan analisis keragaman dan uji BNJ ternyata bilangan asam biodiesel kontrol (tanpa antioksidan) mengalami kenaikan paling tinggi selama penyimpanan hingga 3,6 mg KOH/g contoh pada minggu ke empat (Tabel 4, Lampiran 1, Gambar 9). Ini memperkuat indikasi bahwa dekomposisi senyawa peroksida pada proses oksidasi biodiesel tersebut berlangsung cepat tanpa hambatan yang selanjutnya membentuk produk akhir yaitu diantaranya asam karboksilat (Gambar 3). Asam karboksilat tersebut di

Tabel 4. Analisa keragaman terhadap karakteristik (bilangan peroksida, bilangan asam, dan viskositas kinematik) biodiesel minyak jarak pagar

Sumber keragaman		Bilangan peroksida (Peroxide number)		Bilangan asam (Acid number)		Viskositas kinematik (Kinematic viscosity)	
(Sources of variation)	Db (df)	F-hitung (F-calculated)	P	F-hitung (F-calculated)	P	F-hitung (F-calculated)	P
Total -I	119						
Perlakuan (Treatment)	59						
Macam antioksidan (Kinds of antioxidants),	2	6,23	**	4,49	*	8,87	**
A							
Konsentrasi antioksidan (Concentration of	3	4,92	**	4,53	*	12,57	**
antioxidant), B							
Minggu penyimpanan (Storage week), C	4	5,17	**	6,98	**	6,21	**
Interaksi (Interaction)							
AB	6	2,31	tn	4,90	*	5,02	*
AC	8	1,89	tn	8,90	**	2,78	tn
BC	12	12,34	**	9,87	**	7,22	**
ABC	24	9,73	**	10,67	**	10,76	**
Gakat-I (Error-I)	60						
Total-II	129						
Antioksidan - Kontrol (Antioxidant -	64	10,28	**	9,78	**	12,77	**
Control)							
Galat-II (Error-II)	65						
Rata-rata (Means)		16,71		0,24		4,80	
Satuan (Units)		mg O ₂ /100 g contoh (sample)		mg KOH/g contoh (sample)		Cst	
KK, %		3,48		7,32		9,27	
D 0.05		9,472		0,057		0,212	
Keterangan (Remarks): * = nyata pada taraf (significant at) 5%; ** = nyata pada (significant at) 1%; tn = tak nyata (not significant); KK = koefisien keragaman (coeff. of variation); P = peluang (probability); D0.05 = nilai kritis uji jarak beda nyata jujur Tukey pada taraf (Critical value of Tukey's honestly significant difference at) 5%							



Gambar 7. Histogram hubungan antara konsentrasi masing-masing macam bahan antioksidan (A1, A2, dan A3) dengan bilangan peroksida biodiesel, menurut waktu penyimpanan (minggu)

Figure 7. Histogram describing the relation between concentration of each kind of antioxidant (A1, A2, and A3) and peroxyde number of biodiesel, scrutinized by storage duration (weeks)

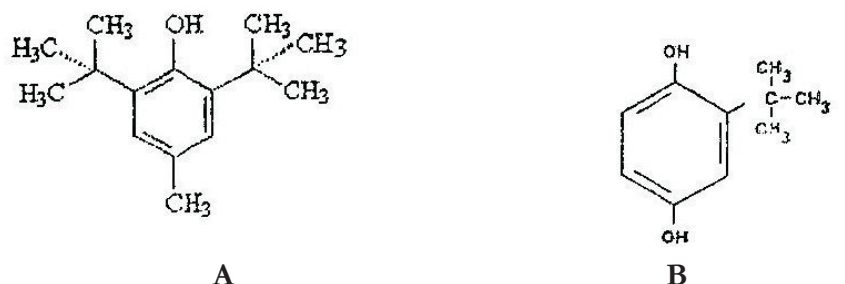
Keterangan (Remarks): Bilangan Peroksida (Peroxide number), Kombinasi Perlakuan (Treatment combination), Antioksidan (A): (A1 = BHT, A2 = TBHQ, A3 = Formula X), Antioksidan konsentrasi (B): (B1 = 0,03%, B2 = 0,05%, B3 = 0,07%, B4 = 0,10%), Storage duration (C): (C0 = minggu 0 (immediately), C1 = minggu 1 (first week), C2 = minggu 2 (second week), C3 = minggu 3 (third week), C4 = minggu 4 (fourth week)), Kontrol (Control (without antioxidants))

samping asam lemak bebas berperan pula dalam menentukan dan meningkatkan bilangan asam biodiesel. Dengan peningkatan waktu penyimpanan, bilangan asam juga meningkat pada biodiesel dengan antioksidan (BHT, TBHQ, dan Formula X), tetapi tidak sebesar pada biodiesel kontrol (berturut-turut 36,11%, 44,44%, dan 22,25%). Ini berindikasi pula memperkuat hasil pencermatan bilangan peroksida sebelumnya bahwa penggunaan antioksidan menghambat oksidasi biodiesel, sehingga walaupun tetap terjadi oksidasi dengan meningkatnya waktu (minggu) penyimpanan, tetapi banyaknya asam karboksilat yang terbentuk lebih sedikit dibandingkan asam dari biodiesel kontrol sebagaimana ditunjukkan dengan lebih rendahnya bilangan asam biodiesel yang menggunakan antioksidan (Gambar 8).

Pada penyimpanan minggu pertama dan ke dua, belum ada perbedaan bilangan asam biodiesel akibat penggunaan antioksidan yang berbeda (BHT, TBHQ, dan Formula X) (Tabel 4 dan Gambar 8). Perbedaan tersebut mulai nampak pada minggu penyimpanan ke tiga dan ke empat (Lampiran 1). Pada minggu ke tiga, antioksidan yang paling efektif (bilangan asam terendah) adalah TBHQ pada konsentrasi 0,05 - 0,10%,

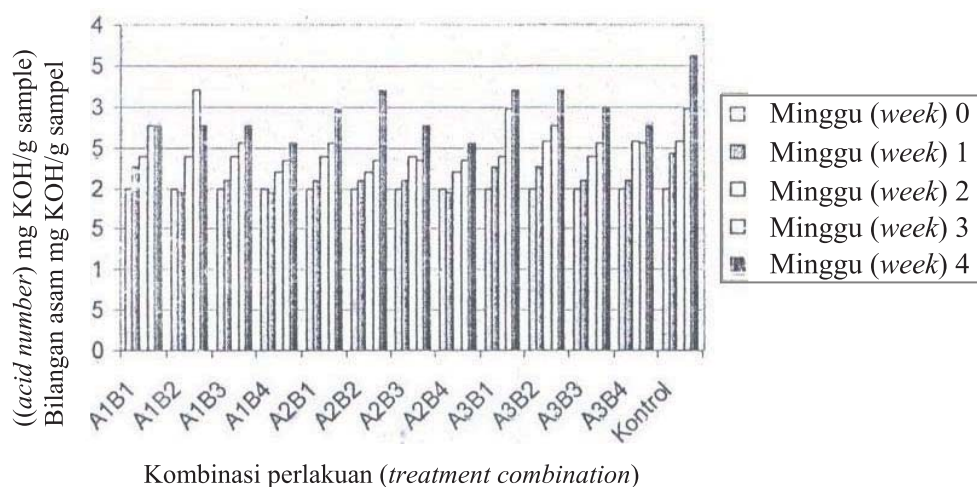
disusul oleh BHT pada konsentrasi 0,10% dan Formula X pada konsentrasi 0,07 - 0,10%. Selanjutnya pada minggu ke empat, antioksidan yang paling efektif dan sama efektifnya adalah TBHQ dan BHT pada konsentrasi 0,10%, diikuti oleh Formula X pada konsentrasi 0,05 - 0,10%. Kesemuanya berindikasi memperkuat hasil pencermatan bilangan peroksida sebelumnya di mana antioksidan TBHQ paling efektif menghambat oksidasi biodiesel, disusul berturut-turut oleh BHT dan Formula X.

Berdasarkan hasil uji BNJ (Lampiran 1), kombinasi perlakuan yang terbaik dalam menghasilkan bilangan asam terendah pada minggu penyimpanan pertama adalah dengan penggunaan antioksidan TBHQ dan BHT masing-masing pada konsentrasi 0,10%; pada minggu ke dua dan ke tiga dengan TBHQ masing-masing pada konsentrasi 0,07 - 0,10%; dan pada minggu ke empat dengan TBHQ dan BHT masing-masing pada konsentrasi 0,10%. Lebih lanjut, bilangan asam biodiesel baik kontrol ataupun dengan antioksidan berkisar 0,19 - 0,36 (Lampiran 1). Selanjutnya dibandingkan dengan persyaratan bilangan asam menurut SNI (Anonim, 2006) yaitu $\leq 0,8$ (Tabel 2), maka seluruh biodiesel ini memenuhi syarat.



Gambar 8. Struktur kimia BHT (*Butylated hydroxytoluene*) (A), dan TBHQ (*tert-Butylhydroquinone*) (Canacci dan Gerpen, 2001)

Figure 8. Chemical structures of BHT (*Butylated hydroxytoluene*) (A), and TBHQ (*tert-Butylhydroquinone*) (Canacci and Gerpen, 2001)



Gambar 9. Histogram hubungan antara konsentrasi masing-masing bahan anti oksidan (A1, A2, dan A3) dengan bilangan asam biodiesel, menurut waktu penyimpanan tertentu (minggu)

Figure 9. Histogram describing the relation between kinds of antioxidants (A1, A2, and A3) and acid number of biodiesel, scrutinized by storage duration (weeks)

Keterangan (*Remarks*): Bilangan Peroksida (*Peroxide number*), Kombinasi Perlakuan (*Treatment combination*), Antioksidan (A) (A1 = BHT, A2 = TBHQ, A3 = Formula X), Antioksidant concentration (B): (B1 = 0,03%, B2 = 0,05%, B3 = 0,07%, B4 = 0,10%), Storage duration (C): (C0 = minggu 0 (*immediately*), C1 = minggu 1 (*first week*), C2 = minggu 2 (*second week*), C3 = minggu 3 (*third week*), C4 = minggu 4 (*fourth week*)), Kontrol (*Control (without antioxidants)*)

Berdasarkan hasil uji BNJ (Lampiran 1), kombinasi perlakuan yang terbaik dalam menghasilkan bilangan asam terendah pada minggu penyimpanan pertama adalah dengan penggunaan antioksidan TBHQ dan BHT masing-masing pada konsentrasi 0,10%; pada minggu ke dua dan ke tiga dengan TBHQ masing-masing pada konsentrasi 0,07 - 0,10%; dan pada minggu ke empat dengan TBHQ dan BHT masing-masing pada konsentrasi 0,10%. Lebih lanjut, bilangan asam biodiesel baik kontrol ataupun dengan antioksidan berkisar 0,19 - 0,36

(Lampiran 1). Selanjutnya dibandingkan dengan persyaratan bilangan asam menurut SNI (Anonim, 2006) yaitu $\leq 0,8$ (Tabel 2), maka seluruh biodiesel ini memenuhi syarat.

c. Viskositas kinematik

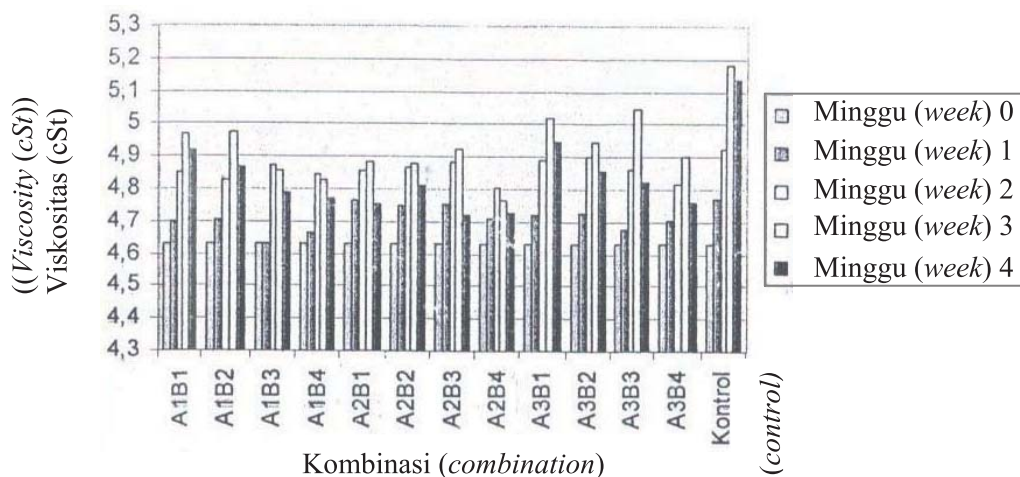
Berdasarkan analisa keragaman (Tabel 4) dan uji BNJ (Lampiran 1), ternyata viskositas kinematik biodiesel kontrol (tanpa antioksidan) mengalami peningkatan paling tinggi dibandingkan viskositas biodiesel dengan antioksidan (BHT, TBHQ, dan Formula X) selama penyimpanan (11,02% terhadap berturut-turut

4,32%, 1,94%, dan 5,83%) (Gambar 10). Untuk biodiesel kontrol, walaupun ada kecenderungan penurunan viskositas pada perubahan minggu penyimpanan ke tiga menjadi ke empat, tetapi penurunan tersebut tidak nyata (5,18-5,14 Cst). Ini dapat dipahami bahwa adanya oksidasi intensif pada biodiesel kontrol (hasil pencermatan bilangan peroksida) menyebabkan degradasi (terbentuknya radikal atau senyawa dengan berat molekul lebih rendah), dan hasil degradasi tersebut mengalami polimerisasi membentuk persenyawaan dengan rantai ikatan lebih panjang dan berat molekul lebih tinggi. Hal tersebut mengakibatkan peningkatan viskositas biodiesel.

Pada penggunaan antioksidan (BHT, TBHQ, dan Formula X), bertambahnya waktu pengamatan hingga minggu ke empat, juga mengakibatkan peningkatan viskositas biodiesel (berturut-turut 4,63 - 4,83 Cst, 4,63 - 4,72 Cst, dan 4,63 - 4,76 Cst). Akan tetapi peningkatan tersebut tidak sebesar viskositas biodiesel kontrol (4,63 - 5,14 Cst). Ini memperkuat indikasi hasil pencermatan bilangan peroksida bahwa penggunaan antioksidan dapat mengambat

oksidasi yang berakibat degradasi minyak biodiesel, sehingga mengurangi intensitas polimerisasi hasil degradasi sebagaimana ditunjukkan dengan lebih rendahnya viskositas dibandingkan biodiesel kontrol (Gambar 10 dan Lampiran 1). Lebih lanjut pada minggu ke dua - ke empat, terdapat kecenderungan sedikit penurunan viskositas biodiesel. Di duga polimer yang terbentuk juga mengalami degradasi (mungkin oleh udara, suhu, dan organisme) menghasilkan senyawa dengan rantai lebih pendek dan berat molekul lebih rendah, sehingga viskositasnya menurun.

Pada minggu pertama dan kedua belum terlihat adanya perbedaan viskositas biodiesel akibat penggunaan antioksidan yang berbeda pula (BHT, TBHQ, dan Formula X) (Gambar 8 dan Lampiran 1). Pada minggu ke tiga dan ke empat, ternyata antioksidan yang paling efektif menurunkan viskositas adalah TBHQ, disusul berturut-turut oleh BHT dan Formula X. Ini memperkuat lagi hasil pencermatan bilangan peroksida bahwa urutan antioksidan dengan efektifitas tertinggi hingga terendah adalah TBHQ, BHT, dan Formula X.



Gambar 10. Histogram hubungan antara konsentrasi masing-masing macam bahan antioksidan (A1, A2, dan A3) dengan viskositas kinematik biodiesel, menurut waktu penyimpanan (minggu)

Figure 10. Histogram describing the relation between concentration of each kind of antioxidants (A1, A2, and A3) and kinematic viscosity of biodiesel, scrutinized by storage duration (weeks)

Keterangan (Remarks): Viskositas kinematik (Kinematic viscosity), Kombinasi Perlakuan (Treatment combination), Antioxidant (A) (A1 = BHT, A2 = TBHQ, A3 = Formula X), Antioxidant concentration (B) (B1 = 0,03%, B2 = 0,05%, B3 = 0,07%, B4 = 0,10%), Storage duration (C) (C0 = minggu 0 (immediately), C1 = minggu 1 (first week), C2 = minggu 2 (second week), C3 = minggu 3 (third week), C4 = minggu 4 (fourth week)), Kontrol (Control (without antioxidants))

Berdasarkan hasil uji BNJ (Lampiran 1) maka kombinasi perlakuan yang terbaik dalam menghasilkan viskositas terendah pada minggu penyimpanan pertama adalah dengan penggunaan antioksidan BHT pada konsentrasi 0,70 - 0,10%; pada minggu ke dua dengan TBHQ pada konsentrasi 0,03 - 0,10%; pada minggu ke tiga dengan TBHQ pada konsentrasi 0,10%; dan pada minggu ke empat dengan TBHQ pada konsentrasi 0,70 - 0,10%. Lebih lanjut, viskositas kinematik biodiesel baik kontrol ataupun dengan antioksidan berkisar 4,63 - 5,18 (Lampiran 1). Selanjutnya dibandingkan persyaratan viskositas menurut SNI (Anonim, 2006) sebesar 1,9 - 6,0 (Tabel 2), maka seluruh biodiesel ini memenuhi syarat.

d. Penelaahan seluruh karakteristik biodiesel yang diamati

Penelaahan ini bertujuan menduga kombinasi perlakuan terbaik (macam bahan antioksidan, konsentrasi antioksidan, dan waktu penyimpanan) berdasarkan karakteristik biodiesel yang diamati (bilangan peroksida, bilangan asam, dan viskositas kinematik) di mana pada keadaan tersebut biodiesel memiliki kinerja paling memuaskan dalam penggunaannya sebagai sumber energi (penggerak) mesin berpiston. Penelaahan tersebut menggunakan hasil manipulasi uji BNJ yang dikemudian ditransformasi dalam bentuk total skor (Lampiran 1).

Untuk waktu penyimpanan minggu pertama, maka biodiesel yang dianggap berkinerja paling memuaskan adalah dengan penggunaan antioksidan BHT pada konsentrasi 0,07 - 0,10% dan TBHQ pada konsentrasi 0,10% (masing-masing dengan total skor = TS = 15), disusul oleh Formula X pada konsentrasi 0,07-0,10% (TS = 14 - 14,5). Selanjutnya untuk minggu ke dua, hal yang serupa adalah dengan BHT pada konsentrasi 0,05 - 0,10% dan dengan TBHQ pada konsentrasi 0,05 - 0,10% (masing-masing dengan TS = 10 - 10,5), disusul oleh Formula X pada konsentrasi 0,07 - 0,10% (TS = 9); untuk minggu ke tiga dengan TBHQ pada konsentrasi 0,05 - 0,10% (TS = 9,5 - 11), disusul berturut-turut oleh BHT pada konsentrasi 0,10% (TS = 9,5), dan oleh Formula X pada konsentrasi 0,07 - 0,10% (TS = 9); dan untuk minggu ke empat dengan TBHQ pada konsentrasi 0,70 - 0,10% (TS = 9,5-10,5), disusul oleh BHT pada konsentrasi 0,07 - 0,10%

(TS = 8,5 - 9), dan oleh Formula X pada konsentrasi 0,10% (TS = 8). Biodiesel kontrol (tanpa antioksidan) memiliki skor tertinggi (TS = 16). Hal ini dapat dipahami karena biodiesel tersebut baru saja mengalami tahap estrans dan belum mengalami oksidasi dari udara penyimpanan. Khusus untuk biodiesel kontrol setelah mengalami oksidasi dari udara penyimpanan, maka skornya mengalami penurunan drastis mulai dari minggu pertama (TS = 11), ke dua (TS = 7,5), ke tiga (TS = 4), hingga minggu ke empat (TS = 3), di mana keseluruhannya jauh di bawah skor untuk biodiesel yang diberi antioksidan. Hal ini memperkuat hasil pencermatan bahwa biodiesel minyak jarak pagar rentan terhadap proses oksidasi dan penggunaan bahan antioksidan dapat menghambat oksidasi tersebut.

IV. KESIMPULAN

Setelah melalui proses estrans, minyak dari hasil ekstraksi biji tanaman jarak (*Jatropha curcas*) memiliki karakteristik (antara lain kerapatan, viskositas kinematik, bilangan asam, bilangan iod, kadar air, dan nilai kalor) yang banyak memenuhi persyaratan SNI untuk biodiesel dan juga sebanding dengan karakteristik petrosolar, sehingga lebih berprospek dimanfaatkan sebagai biodiesel untuk menggerakkan mesin berpiston.

Antioksidan yang paling efektif menghambat oksidasi biodiesel minyak jarak adalah TBHQ (pada konsentrasi 0,07-0,10%), disusul berturut-turut oleh BHT (0,07-0,10%), dan Formula X (0,10%). Peningkatan konsentrasi masing-masing bahan antioksidan cenderung pula mempertinggi ketahanan oksidasi biodiesel. Penggunaan Formula X yang merupakan antioksidan alami diharapkan bisa seefektif antioksidan TBHQ dan BHT, yaitu apabila konsentrasinya ditingkatkan (>0,10%).

DAFTAR PUSTAKA

- Ambarita, M.T. D. 2002. Tranesterifikasi minyak goreng bekas untuk produksi metil ester. Thesis. Program Pasca Sarjana Stratum Dua (S-2), Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Anggraini, A. 2007. Pengaruh penggunaan antioksidan terhadap ketahanan oksidasi biodiesel dari minyak

- jarak pagar. Skripsi (S-1). Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Anonim, 1993. Fossil Fuels. Di dalam: Anonim, Human Impact on the Biosphere, Starr, C, and R, Taggart, Biology: The Unity and Diversity of Life, Walsworth Publishing Company, Belmont, California,
- , 2006. Biodiesel. Standar Nasional Indonesia (SNI) 04-7182-2006, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta, Indonesia,
- , 2008. Teknologi: Energi baru dan terbarukan. Harian Kompas, tgl. 24 Oktober 2008, Hlm. 35. Jakarta.
- Buck, D.F, 1991. Antioxidants. Di dalam: Smith. Food Additive User's Handbook. Blackie Academic and Professional. Glasgow, UK.
- Canakci, M. and J.V. Gerpen, 2001. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. American Society of Agricultural Engineers, 44 (6): 1429-1436.
- Ege, S.N. 1996. Organic Chemistry. D.C. Heath and Company. Lexington - Massachusetts - Toronto.
- Gubits, G.M., M, Mittelbach, and M, Trabi, 1999. Exploitation of the tropical oil from the seeds of *Jatropha curcas* L. plants. Biosource Tech., 67: 73-82.
- Haas, E. and M. Mittelbach, 2000. Detoxification experiments with the seed oil from *Jatropha curcas* L. Industrial Crops and Products, 12: 111-118.
- Hambali, E., A. Suryani, Dadang, Hariyadi, H. Hanafie, I.K. Reksowardjo, M. Rivai, M. Ihsanur, P. Suryadarma, S. Tjitrosoemitro, T.H. Soerawidjaja, T. Prawitasari, T. Prakoso, W. Purnomo, 2006. Jarak Pagar: Tanaman Penghasil Biodiesel. Penebar Swadaya. Jakarta.
- Hamilton, R.J., 1983, The Chemistry of Rancidity in Foods. Di dalam: Allen, J.C. and R.J. Hamilton, 1982. Rancidity in Foods, Hlm. 1-20, Applied Science Publisher. London.
- Heyne, K. 1987. Tumbuhan Berguna Indonesia, Jilid II. Yayasan Sarana Wana Jaya. Jakarta.
- Ingold, K.U. 1962. Metal catalyst. Di dalam: Schultz, H.W., E.A. Day, dan R.O. Sinhuber, Symposium on Foods: Lipids and Their Oxidation. The AVI Publishing Co., Inc. Wessport, Connecticut.
- Ott, R.L. 1994. An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. Fourth ed. Duxbury Press. Belmont. Ca., USA.
- Pari, G. 1983. Mempelajari sifat fisika-kimia minyak biji saga (*Adenanthera pavonia* Linn). Karya Tulis. Akademi Kimia Analisis, Departemen Perindustrian. Bogor
- Perkins, E.G. 1967. Formation and non-volatile decomposition on products in heated fats and oils. Food Technology, 21 (4): 125.
- Rizvi, S.Q. A. 1992. Lubricant additives and their function. Di dalam: ASM Handbook of Friction, Friction, and Wear Technology, Part 18, 1990. ASM International.
- Sonntag, N. 1982. Fat Splitting, Esterification, and Interesterification. Di dalam: Anonim. Bailey's Industrial Oil and Fat Products, 1980. Fourth ed. Vol. II. John Wiley and Sons. New York,
- Sudradjat, H. R. 2006. Memproduksi Biodiesel Jarak Pagar. Penebar Swadaya. Jakarta

Lampiran 1. Data karakteristik biodiesel minyak jarak, yang diikuti dengan hasil uji jarak beda nyata jujur (BNJ) (dinyatakan dalam mutu dan skor)
Appendix 1. Data on the characteristics of Jatropa oil Biodiesel, followed with honestly significant difference (HSD) test (expressed in grades and scores)

Kombinasi perlakuan (Treatment combination)			Karakteristik (Characteristics)										Total skor (Total score)	
			Bilangan peroksida (Peroxide number), mg O ₂ / 100 g contoh (sample)					Bilangan asam (Acid number), mg KOH / g contoh (sample)						Viskositas kinematik (Kinematic viscosity), Cst
			A	B	C	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	M ¹⁾		
1	1	0	1		G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16	(TS)
	1	1	2	8,31	F	6	0,23	CD	3,5	4,70	CD	3,5	13	
1	1	2	3	14,72	DE	4,5	0,24	CD	3,5	4,85	B	2	10	
1	1	3	4	20,69	CD	3,5	0,28	BC	2,5	4,97	AB	1,5	7,5	
1	1	4	5	26,09	C	3	0,28	BC	2,5	4,92	AB	1,5	7	
1	2	0	6	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16	
1	2	1	7	8,07	F	6	0,19	E	5	4,70	CD	3,5	14,5	
1	2	2	8	13,78	E	5	0,24	CD	3,5	4,83	BC	2,5	11	
1	2	3	9	20,02	CD	3,5	0,32	AB	1,5	4,97	AB	1,5	6,5	
1	2	4	10	24,51	C	3	0,28	BC	2,5	4,87	B	2	7,5	
1	3	0	11	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16	
1	3	1	12	7,36	F	6	0,21	D	4	4,63	E	5	15	
1	3	2	13	13,30	E	5	0,24	CD	3,5	4,87	B	2	10,5	
1	3	3	14	18,45	CD	3,5	0,26	C	3	4,86	B	2	8,5	
1	3	4	15	24,28	C	3	0,28	BC	2,5	4,79	C	3	8,5	
1	4	0	16	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16	
1	4	1	17	7,12	F	6	0,19	E	5	4,67	D	4	15	
1	4	2	18	12,59	E	5	0,22	CD	3,5	4,85	B	2	10,5	
1	4	3	19	18,00	CD	3,5	0,23	CD	3,5	4,83	BC	2,5	9,5	
1	4	4	20	23,39	C	3	0,26	C	3	4,77	C	3	9	
2	1	0	21	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16	
2	1	1	22	8,07	F	6	0,21	D	4	4,77	C	3	13	
2	1	2	23	14,49	DE	4,5	0,24	CD	3,5	4,85	B	2	10	
2	1	3	24	17,55	D	4	0,26	C	3	4,88	B	2	9	
2	1	4	25	19,33	CD	3,5	0,30	B	2	4,76	C	3	8,5	
2	2	0	26	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16	

Lampiran 1. Lanjutan
Appendix 1. Continued

Kombinasi perlakuan (Treatment combination)			Karakteristik (Characteristics)										Total skor (Total score)
			Bilangan peroksida (Peroxide number), mg O ₂ / 100 g contoh (sample)				Bilangan asam (Acid number), mg KOH / g contoh (sample)				Viskositas kinematik (Kinematic viscosity), Cst		
A	B	C	T No.	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	(TS)
2	2	1	27	7,60	F	6	0,21	D	4	4,75	C	3	13
2	2	2	28	13,30	E	5	0,22	CD	3,5	4,87	B	2	10,5
2	2	3	29	16,64	D	4	0,23	CD	3,5	4,88	B	2	9,5
2	2	4	30	18,89	CD	3,5	0,32	AB	1,5	4,81	BC	2,5	7,5
2	3	0	31	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16
2	3	1	32	7,36	F	6	0,21	D	4	4,76	C	3	13
2	3	2	33	12,34	E	5	0,24	CD	3,5	4,88	B	2	10,5
2	3	3	34	15,97	DE	4,5	0,23	CD	3,5	4,92	AB	1,5	9,5
2	3	4	35	18,45	CD	3,5	0,28	BC	2,5	4,72	CD	3,5	9,5
2	4	0	36	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16
2	4	1	37	6,41	FG	6,5	0,19	E	5	4,71	CD	3,5	15
2	4	2	38	12,11	E	5	0,22	CD	3,5	4,81	BC	2,5	11
2	4	3	39	15,53	DE	4,5	0,23	CD	3,5	4,76	C	3	11
2	4	4	40	17,10	D	4	0,26	C	3	4,72	CD	3,5	10,5
3	1	0	41	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16
3	1	1	42	10,45	EF	5,5	0,23	CD	3,5	4,72	CD	3,5	12,5
3	1	2	43	21,37	C	3	0,24	CD	3,5	4,89	B	2	8,5
3	1	3	44	32,61	B	2	0,30	B	2	5,02	AB	1,5	5,5
3	1	4	45	38,25	B	2	0,32	AB	1,5	4,95	AB	1,5	5
3	2	0	46	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16
3	2	1	47	9,97	EF	5,5	0,23	CD	3,5	4,73	CD	3,5	12,5
3	2	2	48	21,38	C	3	0,26	C	3	4,90	AB	1,5	7,5
3	2	3	49	31,04	BC	2,5	0,28	BC	2,5	4,95	AB	1,5	6,5
3	2	4	50	36,68	B	2	0,27	C	3	4,85	B	2	7
3	3	0	51	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16
3	3	1	52	8,31	F	6	0,21	D	4	4,68	D	4	14
3	3	2	53	20,65	CD	3,5	0,24	CD	3,5	4,86	B	2	

Lampiran 1. Lanjutan

Appendix 1. Continued

Kombinasi perlakuan (Treatment combination)			Karakteristik (Characteristics)									Total skor (Total score)
			Bilangan peroksida (Peroxide number), mg O ₂ / 100 g contoh (sample)			Bilangan asam (Acid number), mg KOH / g contoh (sample)			Viskositas kinematik (Kinematic viscosity), Cst			
A	B	C	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	M ¹⁾	G ¹⁾	S ¹⁾	(TS)
3	3	3	29,70	BC	2,5	0,26	C	3	5,04	AB	1,5	7
3	3	4	35,53	B	2	0,30	B	2	4,82	BC	2,5	6,5
3	4	0	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16
3	4	1	7,60	F	6	0,21	D	4	4,70	CD	3,5	13,5
3	4	2	19,47	CD	3,5	0,26	C	3	4,82	BC	2,5	9
3	4	3	27,89	BC	2,5	0,26	C	3	4,90	AB	1,5	7
3	4	4	31,94	BC	2,5	0,28	BC	2,5	4,76	C	3	8
k	k	0	4,75	G	7	0,20	D	4	4,63	E	5	16
k	k	1	14,49	DE	4,5	0,24	CD	3,5	4,77	C	3	11
k	k	2	25,89	C	3	0,26	C	3	4,93	AB	1,5	7,5
k	k	3	50,37	A	1	0,30	B	2	5,18	A	1	4
k	k	4	68,82	A	1	0,36	A	1	5,14	A	1	3

Keterangan (Remarks): A = Macam bahan anti oksidan (Kinds of antioxidants), a1=BHT, a2=TBHQ, a3 = Formula X; B = Konsentrasi anti oksidan (Concentration of antioxidant); b1=0.03%, b2= 0.05%, b3= 0.07%, b4= 0.10%; C = Waktu penyimpanan (Storage duration); c0 = minggu ke 0 (immediate); c1 = minggu pertama (first week); c2 = minggu ke dua (second week); c3 = minggu ke tiga (third week); c4 = minggu ke empat (fourth week); k = kontrol (biodiesel tanpa antioksidan) / control (biodiesel without antioxidant); T No. = Nomor kombinasi perlakuan (Treatment combination number); M = Nilai rata-rata dari 2 ulangan (Average value of two replications); G = Mutu (Grade)¹⁾ angka dalam kolom M yang diikuti secara horizontal oleh huruf yang sama dalam kolom G tak berbeda nyata (Figures in M column followed horizontally by the same letters in G column are not significantly different: A > B > C > D > E > F > G; 3); S1, S2, S3 = Skor untuk berturut-turut bilangan peroksida, bilangan asam, dan viskositas kinematik (Scores for consecutively peroxide number, acid number, and kinematic viscosity), semakin tinggi skor, maka semakin baik karakteristik biodiesel (the greater the score, then the better the characteristics of biodiesel); Total skor (Total scores) = TS = S1 + S2 + S3